

盐胁迫对竹柳幼苗生理响应及结构解剖的研究

洪文君^{1,2}, 申长青¹, 庄雪影¹, 黄久香^{1*}

(1. 华南农业大学中国南方石灰岩植物研究中心, 林学与风景园林学院, 广州 510642; 2. 三亚市林业科学研究院, 海南 三亚 572023)

摘要: 为了解盐胁迫对竹柳(*Salix* spp.)幼苗生长的影响, 采用土培方法, 对 NaCl 胁迫下半年生竹柳扦插苗的成活率、生理响应和根叶部结构进行研究。结果表明, 在 0.25% NaCl 胁迫(轻度盐胁迫)下竹柳能正常生长, 而在>0.5% NaCl (中度、重度盐胁迫)下生长受到抑制, 推断竹柳的耐盐阈值是 0.5%。随着 NaCl 浓度的增大, 叶片相对含水量、叶绿素 a 含量、叶绿素总含量和叶绿素 a/b 均呈下降趋势; 但叶绿素 b 含量、脯氨酸含量和 MDA 含量呈升高趋势。在轻度盐胁迫下, 叶片 SOD 活性和可溶性蛋白含量均升高, 在中、重度盐胁迫下显著下降。从根叶解剖结构来看, 叶片、角质层、栅栏组织厚度和根部周皮和直径在轻度盐胁迫时最大, 但在中度盐胁迫时叶片栅栏组织细胞长度减小且排列越来越疏松, 根部输导组织细胞不正常。这表明竹柳在轻度胁迫时具有一定的耐盐性, 但在中高度盐胁迫下生长不良。

关键词: 竹柳; 盐胁迫; 幼苗; 生理特性; 叶片; 根; 解剖结构

doi: 10.11926/jtsb.3741

Effect of NaCl Stress on Physiological Responses and Anatomical Structure of *Salix* spp. Seedlings

HONG Wen-jun^{1,2}, SHEN Chang-qing¹, ZHUANG Xue-ying¹, HUANG Jiu-xiang^{1*}

(1. South China Limestone Plants Research Center, College of Forestry and Landscape Architecture, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 2. Sanya Academy of Forestry, Sanya 572023, Hainan, China)

Abstract: In order to understand the effects of NaCl stress on the seedling growth of *Salix* spp., the survival rate, physiological response and anatomical structure of half-year-old *Salix* spp. seedlings were studied under salt stress by pot-culture method. The results showed that the growth of seedlings was well treated with 0.25% NaCl (light salt stress), while it was inhibited treated with more than 0.5% NaCl (moderate and severe salt stress). It was deduced that the salt tolerant threshold of *Salix* spp. was 0.5%. The relative water content, the content of Chl a, Chl a+b and Chl a/b decreased as salt stress enhanced, while the Chl b, proline and malondialdehyde (MDA) contents increased gradually. The activity of superoxide dismutase (SOD) and soluble protein content increased under light salt stress, but significantly declined under moderate and severe salt stress. The thickness, cuticle, palisade tissue of leaf and the diameter and periderm of root were the biggest treated with 0.25% NaCl, while under moderate salt stress, the cell length in palisade tissue of leaf decreased with loose arrangement and the cells in transfusion tissue of root was abnormal. Therefore, it was suggested that *Salix* spp. had tolerance to light salt stress, and undergrowth at moderate and severe salt stress.

Key words: *Salix* spp.; Salt stress; Seedling; Physiological characteristic; Leaf; Root; Anatomical structure

收稿日期: 2017-03-23

接受日期: 2017-05-12

基金项目: 华南农业大学与珠海市地方合作项目(4400-H14342)资助

This work was supported by the Cooperation Project of South China Agricultural University and Zhuhai City (Grant No. 4400-H14342).

作者简介: 洪文君(1990~), 女, 硕士研究生。E-mail: hongwenjun0827@126.com

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: jxhuang@scau.edu.cn

滨海盐渍土中富含可溶性盐分,是影响和限制植物生长的重要环境因素之一。滨海植物通常具有较强的耐盐性^[1-2]。由于人为干扰,天然植被退化,耐盐植物的筛选和利用已成为滨海盐渍土植被恢复和可持续发展的重要途径。

竹柳(*Salix* spp.)为杨柳科(Saliaceae)柳属树种,具有生长快^[3-5]、耐盐碱^[6-7]、材质优良和干形优美^[8]等特性。竹柳的扦插繁殖能力较强^[9-10],能适应华南地区生长^[4,11],但病虫害对其规模化发展的影响不可忽视。此外,从竹柳的生理特性来看,其可通过干枯脱落、顶芽萎蔫下垂的避旱策略来应对干旱胁迫^[12-13],具有一定的耐盐性^[5,14],对镉的耐性较强及对重金属胁迫有更强的耐性^[6-7]。

耐盐植物对盐分胁迫通常会在形态结构和生理过程中表现出适应性特征。许多植物在受到盐胁迫时,其解剖结构会发生一系列的变化来适应高盐环境。对竹柳在盐胁迫下的生理生化研究已有报道^[6-7],但盐胁迫过程中营养器官的解剖结构变化及对盐分适应机理尚未见研究报道。本研究通过设置不同浓度的 NaCl 胁迫处理,分析半年生竹柳扦插苗成活率、叶片的生理生化指标及根叶结构解剖特征的变化,为华南沿海地区种植的速生竹柳在滨海盐碱区域的栽植管理提供理论依据和技术支持。

1 材料和方法

1.1 材料

试验地位于广州市天河区华南农业大学树木园温室(113°18'26" E, 23°06'26" N)。广州市地处南亚热带季风区,年平均气温为 21.8℃,年均降雨量 1623.6~1899.8 mm。以长势良好、形态特征相近的盆栽半年生竹柳(*Salix* spp.)扦插苗为材料,营养袋直径为 15 cm,高 13 cm,土壤为树木园内林地黄心土:河沙体积比为 2:1。试验前,竹柳幼苗苗高为 26.8 cm,平均地径为 10.7 mm。苗木生长期采用常规养护管理。

将营养袋土培置于 50 cm×35 cm×15 cm 的水槽中,用 Hoagland's 营养液培养 3 d。盐胁迫处理参照徐瑞晶等^[15]的方法设置 3 个水平:轻度盐胁迫(2.5 g L⁻¹ NaCl,即盐浓度为 0.25%)、中度盐胁迫(5 g L⁻¹ NaCl,即盐浓度为 0.50%);重度盐胁迫(10 g L⁻¹ NaCl,即盐浓度为 1.00%);以不含 NaCl(即

0 g L⁻¹)为对照,每处理 3 个重复,每个重复 10 株苗木。试验期间用保鲜膜覆盖水槽,减少水分蒸发,尽量保持水槽中 NaCl 的浓度稳定,并观察记录竹柳幼苗生长情况。盐胁迫处理 30 d 后,每个处理采集 3 株幼苗的叶片,置于冰盒泡沫箱内带回实验室,用蒸馏水洗净擦干测定生理生化指标;同时,每个处理采集 3 株幼苗的叶片和细根(直径小于 2 mm),放入自封袋中尽快带回实验室进行解剖结构观察。

1.2 植物生理生化指标测定

采用烘干法测定叶片含水量;考马斯亮蓝 G-250 法测定可溶性蛋白含量;丙酮-乙醇混合液测定叶绿素;氯化硝基四氮唑蓝(NBT)光化还原法测定超氧化物歧化酶(SOD)活性;硫代巴比妥酸(TBA)法测定丙二醛(MDA)含量^[16]。

1.3 石蜡切片法

将叶片剪成约 1 cm×1 cm 小方块(去除主脉),根系洗干净,剪成长约 1 cm 的小段,用 70% FAA [70%酒精:冰醋酸:甲醛=90:6:4 (V/V/V)]固定,立即用抽真空机将瓶中空气抽出,浸泡固定至少 24 h 以上。按照石蜡切片法制片,厚度 8~10 μm,番红-固绿双重染色,中性树胶封固。用 Leica-DMLB 显微镜观察并照相,利用 Image J 软件测量根直径、周皮厚度、皮层厚度、木质部厚度、韧皮部厚度和韧皮部与木质部之比;测量叶片的厚度、角质层厚度、上下表皮厚度、栅栏组织厚度和海绵组织厚度等。每个样品测量 10 个样本,每个样本测量 5 个视野,以平均值表示。

1.4 数据分析

采用 Microsoft Excel 2010 进行数据计算,单因素方差分析(One-Way ANOVA)和 Duncan's 多重比较采用 SPSS 19.0 软件;PCA 主成分分析(Principal Component Analysis)采用软件 CANOCO 4.5 完成。

2 结果和分析

2.1 苗木成活率的比较

由图 1 可见,对照和轻度盐胁迫的苗木成活率均达 100%,苗木生长较为旺盛,保持正常生长;但中度和重度盐胁迫处理的苗木出现叶尖焦卷、叶片黄缩、脱落等受损现象;中度和重度盐胁迫处理组

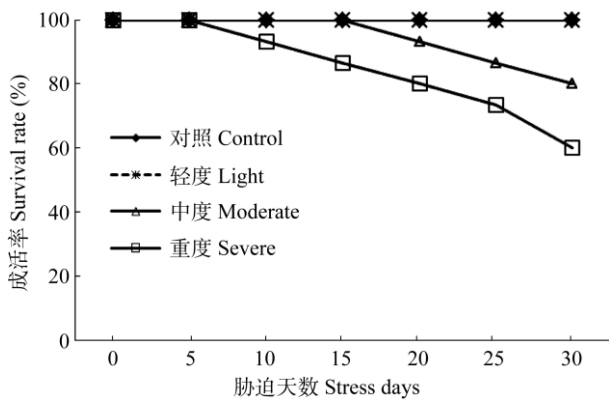


图 1 盐胁迫下的竹柳苗木成活率

Fig. 1 Survival rate of bamboo willow under salt stress

表 1 盐胁迫下竹柳苗木叶绿素含量的变化

Table 1 Changes in chlorophyll contents of bamboo willow seedlings under salt stress

NaCl (g L ⁻¹)	Chl a (mg g ⁻¹ FW)	Chl b (mg g ⁻¹ FW)	Chl a + b (mg g ⁻¹ FW)	Chl a/b
0	2.82 ± 0.06a	0.62 ± 0.05b	3.45 ± 0.06a	4.53 ± 0.16a
2.5	2.94 ± 0.05a	0.82 ± 0.13ab	3.74 ± 0.28a	3.59 ± 0.38b
5	1.92 ± 0.11a	0.93 ± 0.12ab	2.86 ± 0.22b	2.04 ± 0.36b
10	1.18 ± 0.55b	1.50 ± 0.01a	2.69 ± 1.05b	0.92 ± 0.12c

同列数据后不同字母表示差异显著(P<0.05)。下表同。

Data followed different letter means significantly different at 0.05 level. The same is following Tables.

2.3 苗木叶片生理生化的变化

随着盐胁迫程度的加剧,苗木叶片的相对含水量呈缓慢下降趋势;轻度盐胁迫可促进竹柳幼苗可溶性蛋白含量和 SOD 活性的增加,但在中度

分别在第 20 天和第 10 天出现植株凋亡。因此,竹柳幼苗能适应轻度盐胁迫,但不能长期在盐浓度高于 0.50% 的环境生长。

2.2 苗木叶绿素含量的变化

在轻度盐胁迫下,竹柳叶片的叶绿素 a 和叶绿素总量增加;而在中、高度盐胁迫下,其叶绿素 a、叶绿素总量和叶绿素 a/b 均呈下降趋势,但叶绿素 b 呈上升趋势(表 1),说明盐胁迫对竹柳的叶绿素含量有一定的影响。重度盐胁迫的苗木叶绿素 a 含量受到抑制,但叶绿素 b 含量增加,导致叶绿素 a/b 下降。

和高度盐胁迫下,则呈下降趋势;叶片 MDA 和脯氨酸含量随着盐胁迫的加剧呈升高趋势,高度盐胁迫下,细胞结构受到伤害,导致体内 MDA 含量增加。

表 2 盐胁迫下竹柳苗木生理生化指标的变化

Table 2 Changes in physiological indexes of bamboo willow under salt stress

NaCl (g L ⁻¹)	相对含水量 Relative water content (%)	可溶性蛋白含量 Soluble protein content (mg g ⁻¹ FW)	SOD (U g ⁻¹ FW)	MDA (μmol g ⁻¹ FW)	脯氨酸含量 Proline content (μg g ⁻¹ FW)
0	93.41 ± 4.29a	109.44 ± 14.69a	39.59 ± 9.13b	0.61 ± 0.07b	22.89 ± 3.24d
2.5	90.27 ± 1.09a	117.3 ± 12.34a	50.75 ± 1.83a	0.74 ± 0.01b	41.68 ± 4.05c
5	87.31 ± 1.50b	79.37 ± 6.85b	23.73 ± 1.81c	1.18 ± 0.17a	66.56 ± 3.90b
10	76.93 ± 4.90b	70.69 ± 4.91b	22.39 ± 3.79c	1.42 ± 0.24a	89.15 ± 8.74a

2.4 苗木叶片结构的变化

竹柳叶片为等面叶,由表皮层、叶肉组织和维管束部分结构组成。竹柳上、下表皮层均有一层细胞,气孔在上、下表皮均有分布。对照的叶肉组织结构较为均匀,叶近轴面和远轴面均为栅栏组织,海绵组织分布极为不明显(图 2: a, e)。随着盐胁迫程度加剧,竹柳叶片上、下表皮细胞无明显变化,但叶片厚度、角质层、上栅栏组织厚度表现为先升高后降低,在轻度盐胁迫下达到最大(图 2: b, f);与对照

相比,栅栏组织细胞数量减少,细胞长度缩短且排列越来越疏松;在中度和重度盐胁迫处理组栅栏组织的细胞排列不规则,细胞结构被破坏(图 2: c, d, g, h),说明中度和重度盐胁迫影响竹柳幼苗叶片结构。

2.5 幼苗根部结构的变化

由图 3 可见,竹柳根部由周皮、木质部和韧皮部结构组成。盐胁迫对根部结构影响较为明显,中度以上盐胁迫下根部输导组织细胞不正常。随着盐

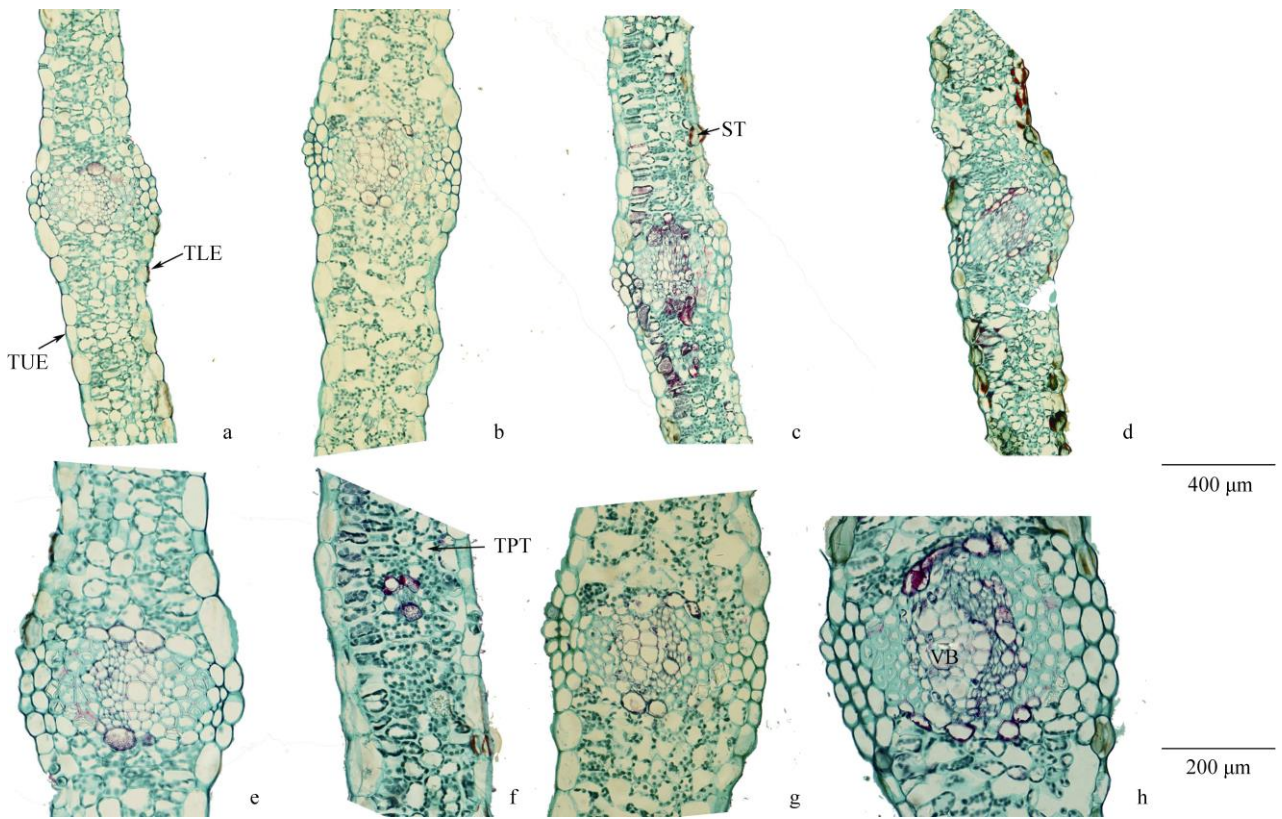


图 2 不同盐胁迫下竹柳叶片横切面结构变化。a, e: 对照; b, f: 轻度盐胁迫; c, g: 中度盐胁迫; d, h: 重度盐胁迫; TUE: 上表皮层; TLE: 下表皮层; TPT: 栅栏组织; ST: 气孔; VB: 维管束。

Fig. 2 Leaf structure of bamboo willow seedlings under salt stress. a, e: Control; b, f: Light salt stress; c, g: Moderate salt stress; d, h: Severe salt stress; TUE: Upper epidermis; TLE: Lower epidermis; TPT: Palisade tissue; ST: Stomata; VB: Vascular bundle.

表 3 不同盐胁迫下竹柳叶片结构的比较

Table 3 Compared to the leaf structure of Bamboo willow under different salt stress

NaCl (g L ⁻¹)	厚度 Thickness (μm)	角质层厚度 Cuticle thickness (μm)	上表皮厚度 Thickness of upper epidermis (μm)	下表皮厚度 Thickness of lower epidermis (μm)	上栅栏组织 Upper palisade tissue		下栅栏组织 Lower palisade tissue	
					层数 Number of layer	厚度 Thickness (μm)	层数 Number of layer	厚度 Thickness (μm)
0	279.86 ± 7.76c	5.99 ± 1.27b	30.69 ± 5.81a	31.29 ± 2.57a	2	135.02 ± 8.91b	1	50.56 ± 7.47
2.5	370.37 ± 16.31a	11.32 ± 1.32a	32.32 ± 3.82a	34.05 ± 3.47a	2	130.03 ± 6.80a	1	60.85 ± 8.56
5	305.64 ± 10.75b	9.29 ± 1.27a	36.26 ± 3.07a	34.10 ± 3.41a	2	116.12 ± 8.41ab	0	49.31 ± 9.85
10	295.87 ± 7.58b	7.23 ± 1.42ab	38.43 ± 7.74a	32.70 ± 4.53a	2	103.92 ± 9.73	0	75.03 ± 6.8

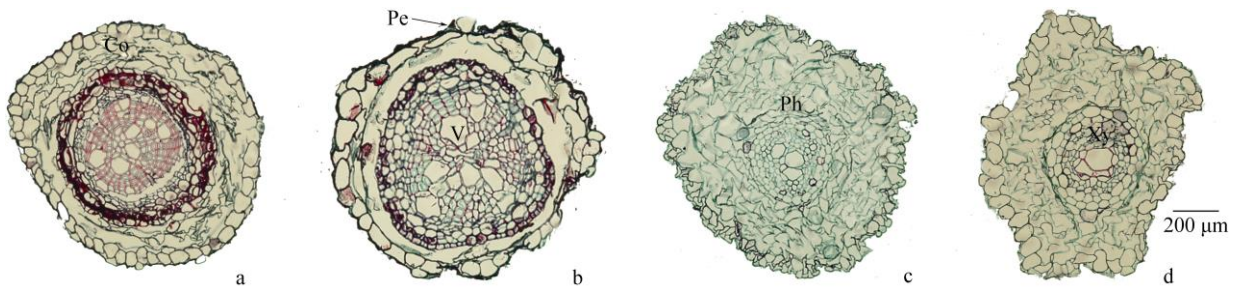


图 3 盐胁迫下竹柳幼苗的根部结构。a: 对照; b: 轻度盐胁迫; c: 中度盐胁迫; d: 重度盐胁迫; Co: 皮层; Pe: 周皮; Xy: 木质部; Ph: 韧皮部; V: 导管。
Fig. 3 Root structure of bamboo willow seedlings under salt stress. a: Control; b: Light salt stress; c: Moderate salt stress; d: Severe salt stress; Co: Cortex; phloem; Xy: Xylem; Ph: Phloem; V: Vascular.

表 4 盐胁迫下的竹柳幼苗根部结构

Table 4 Compared to the root structure of bamboo willow seedlings under different salt stress

NaCl (g L ⁻¹)	半径 Radius (μm)	周皮 / 半径 Epidermis / radius (%)	皮层 / 半径 Cortex / radius (%)	韧皮部 / 半径 Phloem / radius (%)	木质部 / 半径 Xylem / radius (%)	韧皮部 / 木质部 Phloem / xylem (%)
0	524.28 ±41.35b	19.79 ±1.74a	9.77 ±1.40b	19.71 ±1.29b	50.48 ±2.33a	39.05 ±2.65d
2.5	628.62 ±32.01a	27.49 ±2.72a	9.64 ±0.98b	16.92 ±1.30a	46.57 ±2.7b	36.33 ±4.65c
5	604.15 ±34.83a	25.30 ±5.49a	23.76 ±1.80a	18.94 ±1.55a	32.75 ±3.29c	57.83 ±5.97b
10	509.88 ±37.81b	22.86 ±11.24a	35.33 ±0.61a	18.15 ±1.79a	23.96 ±1.71c	75.75 ±10.95a

胁迫程度的加剧, 竹柳根部直径和周皮/半径比表现为先上升后降低, 以轻度盐胁迫时最大(表 4), 分别比对照增加 19.9%和 38.9%; 皮层/半径比增大, 但薄壁细胞形态不规则; 木质部/半径比呈显著降低。由于中度以上盐胁迫引起根系组织发育不正常, 从而影响养分和水分的吸收。

2.6 PCA 分析

以盐胁迫处理对叶片 8 个生理生化因子和 11 个结构因子进行 PCA 分析, 结果表明, 第一和第

二主成分的累积贡献率达 87.2% (图 4)。PC1 主要因子为可溶性蛋白含量、MDA、海绵组织、根部韧皮部/木质部和皮层; PC2 主要因子为叶片相对含水量、叶片角质层和根部直径。由图 4 可以看出, 对照与盐胁迫处理的因子响应不同, 植物生理生化因子与解剖结构特征因子存在密切相关。轻度盐胁迫响应的主要因子有叶片厚度和角质层, 中度盐胁迫的主要因子有脯氨酸含量、下表皮厚度和周皮, 重度盐胁迫的主要因子有 MDA 含量、根韧皮部、木质部比例和韧皮部/木质部。

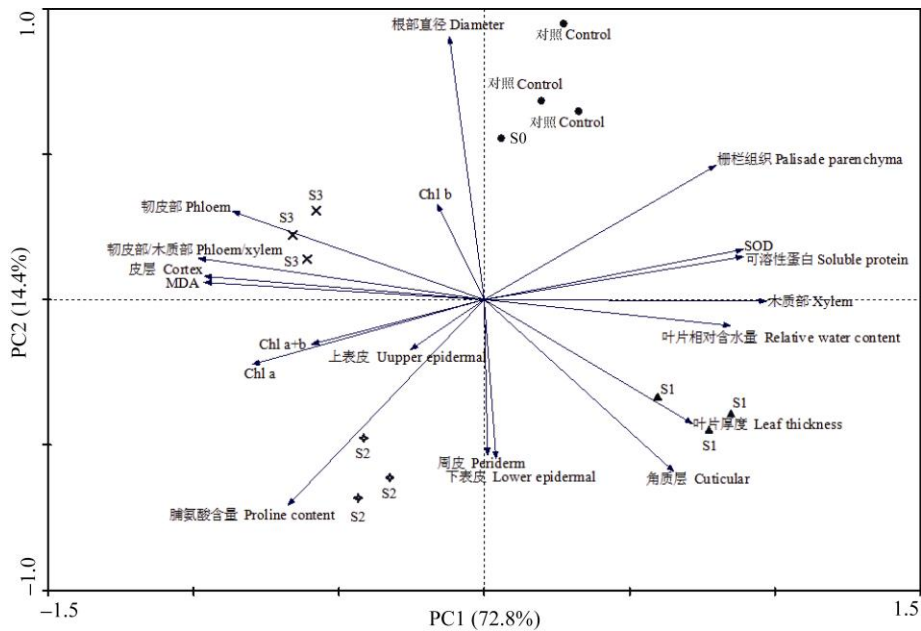


图 4 不同盐胁迫处理下竹柳幼苗 PCA 排序。S0: 对照; S1: 轻度胁迫; S2: 中度胁迫; S3: 重度胁迫。

Fig. 4 PCA of bamboo willow seedlings under salt stress. S0: Control; S1: Light salt stress; S2: Moderate salt stress; S3: Severe salt stress.

3 结论和讨论

竹柳能忍耐轻度的盐胁迫, 且生长良好, 成活率较高, 但 NaCl>0.50%时, 发生生长不良, 出现死亡现象。轻度盐胁迫可促进竹柳的可溶性蛋白含量增加和 SOD 活性的增大; 中度和高度的盐胁迫

导致叶片相对含水量、叶绿素 a 含量、可溶性蛋白含量减少和 SOD 活性下降。叶片和根解剖结构揭示竹柳能适应轻度盐胁迫, 叶片和根部组织有较强的调节和适应盐胁迫能力, 通过提高角质层和叶片厚度, 栅栏组织细胞数量减少且排列疏松以及根部周皮、皮层厚度增加, 木质部减小来适应轻度盐胁迫。

迫环境。

大量研究表明,在盐胁迫下,植物叶片的 MDA 含量和 SOD 活性均会随着盐浓度的升高而增加或呈现先升后降趋势^[17-19],而渗透调节物质是适应盐渍环境的主动调节物质^[20]。王文成等^[5]的研究表明随着盐浓度的增大,竹柳苗木的 MDA 含量和叶片含水量呈现升高趋势,叶绿素、脯氨酸和可溶性糖等含量均呈先升后降的趋势;郝姗姗等^[21]研究表明随着盐浓度的升高,竹柳的根系活力、SOD 和 POD 活性均先升高后下降,但 MDA 含量则呈现先降后升的变化;季琳琳等^[22]的研究揭示了随着时间的延长和 NaCl 浓度增加,竹柳的成活率、MDA 含量和根系活力呈下降趋势;廖启焯^[23]的研究表明加拿利海枣(*Phoenix canariensis*)叶绿素 b 含量、MDA 含量随盐浓度增加呈上升趋势,SOD 活性迅速下降。本研究结果表明,竹柳幼苗叶绿素 a 含量和叶绿素总含量随盐胁迫加剧而呈现先升后降的趋势,揭示了中度和高度盐胁迫会导致竹柳叶片细胞膜系统受损,光合作用减弱;竹柳叶片脯氨酸和 MDA 含量随盐胁迫加剧呈现上升的趋势,反映了高度盐胁迫会抑制竹柳叶片渗透调节物质的形成和造成叶片膜质结构的破坏,这与 Shaheen^[17]、程淑娟等^[19]和王伟等^[24]的研究结果一致。

植物为了适应一定的盐胁迫环境,通常根系和叶片的形态特征会发生改变,如适当减少叶面积来降低植物叶片的蒸腾速率,叶肉细胞中栅栏细胞长度纵向伸长可增加叶片对光能的捕获机会,从而适应盐胁迫环境^[25]。本研究结果表明,竹柳叶片结构为等面叶,在轻度盐胁迫时根部结构保持完整,根内周皮和皮层厚度增厚以适应盐胁迫环境;当盐浓度高于 0.5% 时,其根部输导组织细胞结构不正常,木质部显著减小导致竹柳对养分和水分的吸收能力下降。竹柳在盐胁迫下叶片栅栏组织厚度下降是由细胞数量减少、细胞长度减少和排列疏松引起,这与刘睿等^[26]对木榄(*Bruguiera gymnorhiza*)叶片的研究结果相同。叶片角质层增厚可增强竹柳对盐胁迫的适应,与武春霞等^[27]的研究结果一致。Parida 等^[28]的研究表明,盐胁迫下栅栏组织叶肉细胞长度、栅栏组织和海绵组织中的细胞层数的减少是叶肉组织厚度变小的重要原因。在重度盐胁迫下竹柳叶肉组织杂乱,组织结构受到严重伤害^[29-31]。

华南沿海地区土壤通常含有较丰富的盐离子,1 m 土层的含盐量一般为 0.3%~1.2%^[32]。土壤含盐

量有明显的季节变化,春季 1-3 月,广东珠三角地区的咸潮活跃,咸潮的发生和持续会导致土壤含氯量的增加,最高时水中氯化物浓度可高达 3500 mg L⁻¹,最大含氯度达 4722 mg L⁻¹^[33-35]。广东粤海竹柳农林产业开发有限公司于 2012 年在珠海平沙引种了一批粤海竹柳,生长表现较好。王文成等^[5,8]、郝姗姗等^[21]和季琳琳等^[22]对竹柳耐盐性的研究,揭示其具有较强耐盐性。本研究结果也揭示了竹柳具有一定的耐盐性,可适生于盐度 <0.5% 的区域,叶片和根部结构也表现出适应轻度盐胁迫的特点,但在盐度 >0.5% 的区域生长不良,叶片栅栏组织厚度减小,根部周皮和皮层厚度增加、木质部减小抑制了水分和营养运输能力,是导致叶片生理功能下降的根本原因。但植物的耐盐性还受诸多因素的影响,如土壤中盐的成分和气候因子等,大田自然条件下竹柳的耐盐性还需进一步验证与研究。

参考文献

- [1] YANG S, LIU T, ZHANG H X, et al. Growth and physiological characteristics of *Elaeagnus angustifolius* L. under salt stress [J]. J Fujian Coll For, 2014, 34(1): 64-70. doi: 10.3969/j.issn.1001-389X.2014.01.013.
杨升, 刘涛, 张华新, 等. 盐胁迫下沙枣幼苗的生长表现和生理特性 [J]. 福建林学院学报, 2014, 34(1): 64-70. doi: 10.3969/j.issn.1001-389X.2014.01.013.
- [2] QIU L Z, HUANG Y J, HUANG J Q, et al. Comparative study on vegetal and physiological characteristics of different salt-tolerant plants under salt stress [J]. J Zhejiang Univ (Agric Life Sci), 2016, 32(4): 420-427. doi: 10.3321/j.issn:1008-9209.2006.04.015.
裘丽珍, 黄有军, 黄坚钦, 等. 不同耐盐性植物在盐胁迫下的生长与生理特性比较研究 [J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2006, 32(4): 420-427. doi: 10.3321/j.issn:1008-9209.2006.04.015.
- [3] LÜ D W. Introduction experiment of bamboo willow [J]. Prot For Sci Technol, 2011(5): 42-43,53. doi: 10.3969/j.issn.1005-5215.2011.05.016.
吕德文. 竹柳引种试验初报 [J]. 防护林科技, 2011(5): 42-43,53. doi: 10.3969/j.issn.1005-5215.2011.05.016.
- [4] WANG C H, MA S M, WANG Y X, et al. Study on fertilization experiment of *Salix* spp. seedlings [J]. Mod Agric Sci Technol, 2014(4): 147-148. doi: 10.3969/j.issn.1007-5739.2014.04.096.
王春好, 马生敏, 王永祥, 等. 竹柳苗木施肥试验研究 [J]. 现代农业科技, 2014(4): 147-148. doi: 10.3969/j.issn.1007-5739.2014.04.096.
- [5] WANG W C, GUO Y C, LI K Y, et al. Effects of NaCl stress on the

- morphological and physiological indexes of Zhuliu plants [J]. *Acta Agric Bor-Sin*, 2011, 26(S): 143–146. doi: 10.7668/hbxb.2011.S1.030.
- 王文成, 郭艳超, 李克晔, 等. 盐胁迫对竹柳种苗形态及生理指标的影响 [J]. *华北农学报*, 2011, 26(S): 143–146. doi: 10.7668/hbxb.2011.S1.030.
- [6] HU G T, YU Y, YANG X, et al. Uptake, accumulation and translocation of cadmium in bamboo-willow plant [J]. *Acta Sci Circumstant*, 2016, 36(4): 1508–1514. doi: 10.13671/j.hjkxxb.2015.0615.
- 胡国涛, 于阳, 杨兴, 等. 速生树种竹柳对镉的吸收、积累与分布特性 [J]. *环境科学学报*, 2016, 36(4): 1508–1514. doi: 10.13671/j.hjkxxb.2015.0615.
- [7] HU G T, YANG X, CHEN X M, et al. Physiological responses of bamboo-willow plants to heavy metal stress [J]. *Acta Sci Circumstant*, 2016, 36(10): 3870–3875. doi: 10.13671/j.hjkxxb.2016.0030.
- 胡国涛, 杨兴, 陈小米, 等. 速生树种竹柳对重金属胁迫的生理响应 [J]. *环境科学学报*, 2016, 36(10): 3870–3875. doi: 10.13671/j.hjkxxb.2016.0030.
- [8] WANG Z C. Material and green species: Bamboo willow [J]. *Chin For*, 2011 (22): 38.
- 王子成. 用材与绿化兼得树种——速丰竹柳 [J]. *中国林业*, 2011(22): 38.
- [9] MAO X X. Effects of three hormones on cuttage rooting of bamboo-willow [J]. *Hubei Agric Sci*, 2013, 52(5): 1086–1089. doi: 10.3969/j.issn.0439-8114.2013.05.027.
- 毛晓霞. 三种激素对竹柳扦插生根的影响 [J]. *湖北农业科学*, 2013, 52(5): 1086–1089. doi: 10.3969/j.issn.0439-8114.2013.05.027.
- [10] HONG W J, SHEN C Q, LIU Q, et al. Effects of different hormones and substrates on rooting of *Salix* spp. [J]. *For Sci Technol*, 2015(11): 39–41. doi: 10.13456/j.cnki.lykt.2015.11.014.
- 洪文君, 申长青, 刘强, 等. 不同激素和基质对粤海竹柳扦插生根的影响 [J]. *林业科技通讯*, 2015(11): 39–41. doi: 10.13456/j.cnki.lykt.2015.11.014.
- [11] HONG W J, ZHEN X N, WEN X J, et al. Growth and adaptability of *Salix* hybrid in coastal area of Zhuhai [J]. *For Environ Sci*, 2016, 32(5): 46–51. doi: 10.3969/j.issn.1006-4427.2016.05.009.
- 洪文君, 甄学宁, 温秀军, 等. 竹柳在珠海沿海区的生长及适应性研究 [J]. *林业与环境科学*, 2016, 32(5): 46–51. doi: 10.3969/j.issn.1006-4427.2016.05.009.
- [12] PAN X, XIE D X, QIU Q, et al. Effects of drought stress on seedlings physiological indexes of two fast-growing tree species [J]. *J C S Univ For Technol*, 2013, 33(10): 84–88. doi: 10.3969/j.issn.1673-923X.2013.10.018.
- 潘昕, 谢德新, 邱权, 等. 干旱胁迫对两种速生树种苗木生理指标的影响 [J]. *中南林业科技大学学报*, 2013, 33(10): 84–88. doi: 10.3969/j.issn.1673-923X.2013.10.018.
- [13] SONG X G, WANG B, ZHOU G L, et al. Influences of drought stress on photosynthetic characteristics of fragile willow [J]. *J Sichuan For Sci Technol*, 2014, 35(5): 40–44. doi: 10.3969/j.issn.1003-5508.2014.05.009.
- 宋学贵, 王彬, 周光良, 等. 干旱胁迫对竹柳光合特性的影响 [J]. *四川林业科技*, 2014, 35(5): 40–44. doi: 10.3969/j.issn.1003-5508.2014.05.009.
- [14] ZAI X M, HAO S S, SHAO Z G, et al. Effects of *Glomus mosseae* on chlorophyll content and fluorescence parameters of *Salix* spp. under salt stress [J]. *Jiangsu Agric Sci*, 2013, 41(8): 175–178. doi: 10.3969/j.issn.1002-1302.2013.08.068.
- 宰学明, 郝姗姗, 邵志广, 等. 摩西球囊霉对 NaCl 胁迫下竹柳苗叶绿素含量和荧光参数的影响 [J]. *江苏农业科学*, 2013, 41(8): 175–178. doi: 10.3969/j.issn.1002-1302.2013.08.068.
- [15] XU R J, ZHUANG X Y, HUANG H N. Effects of salt stress on seedling growth of *Glyptostrobus pensilis* [J]. *Guangdong Landscape Archit*, 2013, 35(6): 59–61. doi: 10.3969/j.issn.1671-2641.2013.06.020.
- 徐瑞晶, 庄雪影, 黄辉宁. 盐胁迫对水松 *Glyptostrobus pensilis* 幼苗生长的影响研究 [J]. *广东园林*, 2013, 35(6): 59–61. doi: 10.3969/j.issn.1671-2641.2013.06.020.
- [16] LI H S. Principles and Techniques of Plant Physiological Biochemical Experiment [M]. Beijing: Higher Education Press, 2000: 260–261.
- 李合生. 植物生理生化实验原理和技术 [M]. 北京: 高等教育出版, 2000: 260–261.
- [17] SHAHEEN H L, SHAHBAZ M, ULLAH I, et al. Morphophysiological responses of cotton (*Gossypium hirsutum*) to salt stress [J]. *Int J Agric Biol*, 2012, 14(6): 980–984.
- [18] WU Y R, ZHENG Y S. Growth, physiological, and biochemical responses of *Bambusa multiplex* to salt stress [J]. *J Fujian Coll For*, 2012, 32(1): 23–27. doi: 10.3969/j.issn.1001-389X.2012.01.006.
- 吴幼容, 郑郁善. 观音竹对盐胁迫的生长及生理生化响应 [J]. *福建林学院学报*, 2012, 32(1): 23–27. doi: 10.3969/j.issn.1001-389X.2012.01.006.
- [19] CHENG S J, TANG D Q, LIU Q L, et al. Physiological characteristics of two species of *Jasminum* under salt stress [J]. *J Fujian Coll For*, 2012, 32(1): 33–38. doi: 10.3969/j.issn.1001-389X.2012.01.008.
- 程淑娟, 唐东芹, 刘群录, 等. 盐胁迫下的 2 种素馨属植物生理特性 [J]. *福建林学院学报*, 2012, 32(1): 33–38. doi: 10.3969/j.issn.1001-389X.2012.01.008.
- [20] ZHAO K F, FAN H. Halophilou Plant and Their Adaptation to Saline Habitats [M]. Beijing: Science Press, 2005: 189–255.

- 赵可夫, 范海. 盐生植物及其对盐渍生境的适应生理 [M]. 北京: 科学出版社, 2005: 189–205.
- [21] HAO S S, ZAI X M. Effects of NaCl treatment on antioxidant enzyme activity and Bamboo Willow seedling root vigor [J]. *J Anhui Agric Sci*, 2013, 41(15): 6587–6588,6670. doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2013.15.003.
- 郝姗姗, 宰学明. NaCl 处理对竹柳苗根系活力及抗氧化酶活性的影响 [J]. *安徽农业科学*, 2013, 41(15): 6587–6588,6670. doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2013.15.003.
- [22] JI L L, WU Z N, LIU J L, et al. Effect of physiological characteristics of two willows seedling under salt stress [J]. *J NE Agric Univ*, 2014, 45(1): 77–82. doi: 10.3969/j.issn.1005-9369.2014.01.013.
- 季琳琳, 吴中能, 刘俊龙, 等. NaCl 胁迫对两种柳树幼苗生理特性的影响 [J]. *东北农业大学学报*, 2014, 45(1): 77–82. doi: 10.3969/j.issn.1005-9369.2014.01.013.
- [23] LIAO Q L. Influence of soil salinity on growth and physiological indexes of *Phoenix canariensis* seedlings [J]. *J Trop Subtrop Bot*, 2012, 20(2): 163–168. doi: 10.3969/j.issn.1005-3395.2012.02.010.
- 廖启焯. 土壤盐度对加拿利海枣幼苗生长与生理指标的影响 [J]. *热带亚热带植物学报*, 2012, 20(2): 163–168. doi: 10.3969/j.issn.1005-3395.2012.02.010.
- [24] WANG W, DENG Q, JI Q L. Effects of NaCl stress on the biochemical characteristics in six species fiber flax seedling [J]. *China Agric Sci Bull*, 2013, 29(18): 84–88.
- 王伟, 邓倩, 计巧灵. NaCl 胁迫对 6 种纤维亚麻幼苗生化特性的影响 [J]. *中国农学通报*, 2013, 29(18): 84–88.
- [25] WANG B, JU B, ZHAO H J, et al. Photosynthetic performance and variation in leaf anatomic structure of *Betula microphylla* var. *paludosa* under different saline conditions [J]. *Sci Silv Sci*, 2011, 47(10): 29–36.
- 王斌, 巨波, 赵慧娟, 等. 不同盐梯度处理下沼泽小叶桦的生理特征及叶片结构 [J]. *林业科学*, 2011, 47(10): 29–36.
- [26] LIU R, SUN W, CHAO M X, et al. Leaf anatomical changes of *Bruguiera gymnorrhiza* seedlings under salt stress [J]. *J Trop Subtrop Bot*, 2009, 17(2): 169–175. doi: 10.3969/j.issn.1005-3395.2009.02.011.
- 刘睿, 孙伟, 巢牡香, 等. 盐胁迫下木榄幼苗叶片的解剖学变化 [J]. *热带亚热带植物学报*, 2009, 17(2): 169–175. doi: 10.3969/j.issn.1005-3395.2009.02.011.
- [27] WU C X, CHEN X H, YANG J H, et al. Studies on leaf anatomical structure of two species of *Cerasus* under salt stress [J]. *S China Fruits*, 2014, 43(5): 89–91. doi: 10.1023/B:PHOT.0000011951.37231.69.
- 武春霞, 陈兴华, 杨静慧, 等. 盐胁迫下两种樱桃叶片解剖结构变化研究 [J]. *中国南方果树*, 2014, 43(5): 89–91.
- [28] PARIDA A K, DAS A B, MITTRA B. Effects of NaCl stress on the structure, pigment complex composition, and photosynthetic activity of mangrove *Bruguiera parviflora* chloroplasts [J]. *Photosynthetica*, 2003, 41(2): 191–200. doi: 10.1023/B:PHOT.0000011951.37231.69.
- [29] ZHANG J F, ZHANG X D, ZHOU J X, et al. Effects of salinity stress on poplars seedling growth and soil enzyme activity [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2005, 16(3): 426–430.
- 张建锋, 张旭东, 周金星, 等. 盐分胁迫对杨树苗期生长和土壤酶活性的影响 [J]. *应用生态学报*, 2005, 16(3): 426–430.
- [30] MENG F J, WANG Q Y, WANG J Z, et al. Salt resistance of tetraploid *Robinia pseudoacacia* [J]. *J Plant Ecol*, 2008, 32(3): 654–663. doi: 10.3773/j.issn.1005-264X.2008.03.015.
- 孟凡娟, 王秋玉, 王建中, 等. 四倍体刺槐的抗盐性 [J]. *植物生态学报*, 2008, 32(3): 654–663. doi: 10.3773/j.issn.1005-264X.2008.03.015.
- [31] XIANG X N, CHEN T H, WU Y Y, et al. Effects of salt stress on physio-biochemical characteristics and leaf microstructure in *Photinia glabra* ‘Rubens’ seedlings [J]. *Plant Physiol J*, 2014, 50(7): 917–924.
- 项锡娜, 陈泰豪, 吴月燕, 等. 盐胁迫对红叶石楠‘鲁班’生理生化特性及叶片显微结构的影响 [J]. *植物生理学报*, 2014, 50(7): 917–924.
- [32] LIN G S. Major anti-wind and alkali-resisting landscape plants of south China’s seaside region [J]. *For Invent Plan*, 2004, 29(3): 78–81. doi: 10.3969/j.issn.1671-3168.2004.03.021.
- 林广思. 华南滨海区主要抗风耐盐碱园林绿化植物及其种植要点 [J]. *林业调查规划*, 2004, 29(3): 78–81. doi: 10.3969/j.issn.1671-3168.2004.03.021.
- [33] XU J S, LUO C P. Characteristics of saline water activities in the Pearl River Delta in recent years and major studied basin [J]. *Pearl River*, 2005, 26(2): 21–23. doi: 10.3969/j.issn.1001-9235.2005.02.008.
- 胥加仕, 罗承平. 近年来珠江三角洲咸潮活动特点及重点研究领域探讨 [J]. *人民珠江*, 2005, 26(2): 21–23. doi: 10.3969/j.issn.1001-9235.2005.02.008.
- [34] ZHU S H, SHEN H K, LIN H X, et al. Study on activity routines of salt tide in Pearl River Delta [J]. *Pearl River Mod Constr*, 2007(6): 1–7.
- 朱三华, 沈汉堃, 林焕新, 等. 珠江三角洲咸潮活动规律研究 [J]. *珠江现代建设*, 2007(6): 1–7.
- [35] OU S Y. Spatial difference about activity of saline water intrusion in the Pearl (Zhujiang) River Delta [J]. *Sci Geogr Sin*, 2009, 29(1): 89–92. doi: 10.3969/j.issn.1000-0690.2009.01.014.
- 欧素英. 珠江三角洲咸潮活动的空间差异性分析 [J]. *地理科学*, 2009, 29(1): 89–92. doi: 10.3969/j.issn.1000-0690.2009.01.014.